

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaroslav Kubánek**

Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor: 2109R035 Technologie výroby kovů

Téma: **Využití modelu teplotního pole pro optimalizaci technologie chlazení
plynule odlévaných ocelových sochorů**
**Utilization of Temperature Field Model for Optimization of Cooling
Technology of Continuously Cast Steel Billets**

Zásady pro vypracování:

1. Stručná charakteristika technologie plynulého odlévání oceli
2. Popis dostupných matematických modelů teplotního pole plynule odlévaných ocelových předlitků
3. Analýza současné literatury z oblasti optimalizace podmínek primárního, sekundárního a terciárního chlazení z pohledu vzniku povrchových a podpovrchových trhlin pomocí matematických modelů teplotního pole zejména plynule odlévaných ocelových sochorů
4. Shrnutí literárních poznatků z oblasti optimalizace technologie chlazení na zařízení plynulého odlévání oceli
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Články z odborných časopisů fondu Ústřední knihovny VŠB-TU Ostrava, jako např. *Hutnické listy*, *Iron & Steel Technology*, *ISIJ International*, *Metallurgical and Materials Transaction*, *Revue de Métallurgie*, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, *Stahl und Eisen*, *Steel Research International* aj.
- [2] Články z vědeckých publikací získaných pomocí e-zdrojů a odborných databází, jako např. *Springer Link*, *ISI WOK*, *Scopus*, *Metal* aj.
- [3] Sborníky z konferencí, jako např. *SteelSim*, *ISSTech*, *METAL* aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Markéta Tkadlečková, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Dr. Ing. Ladislav Válek

Datum zadání: 30.11.2010

Datum odevzdání: 13.05.2011

prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah BP |
| 2. Zásady pro vypracování BP | 6. Textová část BP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. *V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.*

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

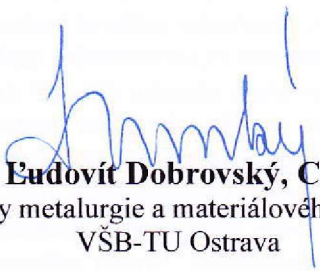
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.

Ostrava 30. 11. 2010


Prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ... 10.5.2011 ...

Jaroslav Kubánek
.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt

Výroba oceli má dlouhou historii. Ale až s nástupem plynulého odlévání oceli, jakožto složitého, ale výkonného prostředku výroby ocelových sochorů, začala tendence využívat nejnovějších poznatků z oblasti vědy a výzkumu k udržení kvality a konkurenceschopnosti jednotlivých ocelářských gigantů při výstavbě nových i modernizaci stávajících provozů plynulého liti.

Tato práce se věnuje objasnění základních principů plynulého odlévání oceli se zaměřením na analýzu současné dostupné světové literatury z pohledu modelování teplotních polí plynule litých předlitků s ohledem na vznik povrchových a podpovrchových trhlin, či vad a dále pak na oblast optimalizace primárního, sekundárního a terciárního chlazení. Je zde nastíněn vývoj směřující k využívání matematických modelů a simulací k optimalizaci průběhu plynulého liti a tendence propojit tyto modely k on-line použití přímo v provozních podmínkách.

Klíčová slova: historie; plynulé odlévání oceli; teplotní pole; vady předlitků; primární, sekundární terciární chlazení; matematické modelování; počítačové simulace.

Abstract

A steel production has a long history. But until the start of operation of continuous casting of steel, as a complex but powerful tool for continuous casting of steel billets, a tendency began to use the latest knowledge from science and research field to maintain the quality and competitiveness of the steel giants during the development of new and upgrading existing plants with continuous casting machines.

This work devotes to clarifying of the basic principles of continuous casting of steel with a focus on the analysis of currently available world literature from the perspective of the temperature field modelling of continuously cast steel billets with regard to the formation of surface and subsurface cracks or defects, and then the area of optimization of primary, secondary and tertiary cooling. It also outlines the progress towards the use of numerical models and simulations to optimize the continuous casting and the tendency to link these models to on-line use direct in operating conditions.

Key words: history; continuous casting of steel; temperature field; defects of billets; primary, secondary and tertiary cooling; mathematical simulation; computer simulation.

Poděkování

Velice rád bych touto formou poděkoval své vedoucí bakalářské práce paní **Ing. Markétě Tkadlečkové, Ph.D.** za podporu, trpělivost a cenné rady při psaní této bakalářské práce, dále pak svému konzultantovi **Dr. Ing. Ladislavu Válkovi** za pomoc při zpracovávání zahraničních článků, poskytnutí konzultací a některých uvedených obrazových materiálů.

Obsah

1	ÚVOD.....	3
2	TEORIE VÝROBY OCELI	4
2.1	Hutnictví	4
2.2	Výroba oceli	5
2.3	Stručná charakteristika technologie plynulého odlévání oceli	5
2.4	Technologie chlazení plynule litých ocelových sochorů.....	8
2.4.1	Primární chlazení	8
2.4.2	Sekundární chlazení.....	9
2.4.3	Terciární chlazení	10
3	VADY PLYNULE LITÝCH OCELOVÝCH SOCHORŮ	11
3.1	Vady vznikající v závislosti na chlazení.....	11
4	MODELOVÁNÍ	12
4.1	Model, modelování, druhy modelů.....	12
4.2	Využití modelů k optimalizaci plynulého lití	13
4.3	Metody řízení ZPO	13
5	TEPLOTNÍ POLE	15
5.1	Matematické modely teplotního pole plynule odléváných předlitků	15
6	ANALÝZA AKTUÁLNÍ CELOSVĚTOVÉ LITERATURY	16
6.1	Metody stanovení teplotního pole	16
6.2	Použití modelů při rekonstrukci ZPO	18
6.2.1	Rekonstrukce krystalizátorů	19
6.2.2	Zóna ohybu s vlivem sekundárního chlazení na ovalitu předlitku	20
6.2.3	Matematický model teplotního pole předlitku.....	21

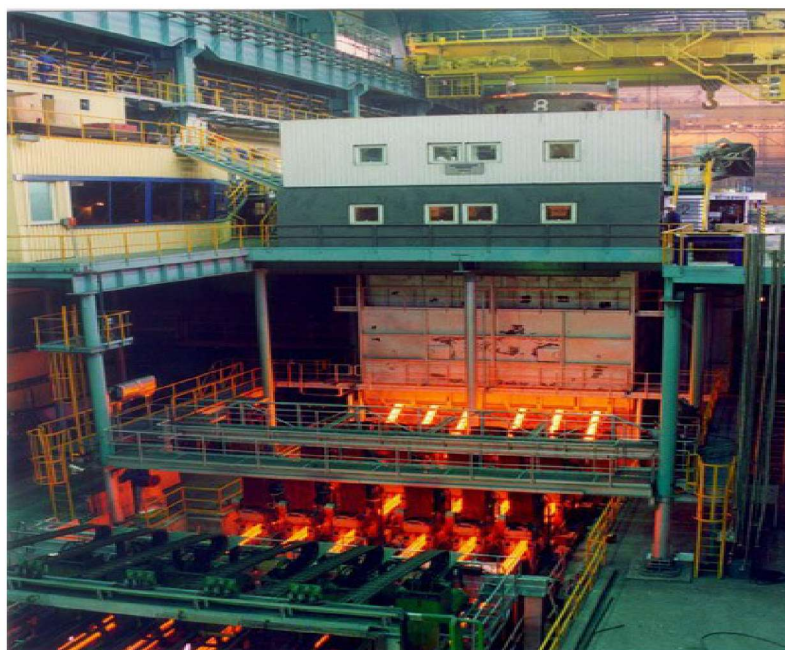
6.2.4	Analýza deformace plynule litého proudu.....	21
6.2.5	Zhodnocení výskytu vzniku vnitřních prasklin	21
6.3	Podmínky tuhnutí peritektické oceli během plynulého lití a chování při vysokých tepl..	23
6.3.1	Průběh experimentu.....	23
6.3.2	Termomechanické modelování pomocí silové zkoušky smrštění	24
6.3.3	Výsledky výpočtů.....	24
6.4	Optimalizace procesu lití oceli s využitím programu COMSOL Multiphysics	25
7	SHRNUTÍ LITERÁRNÍCH POZNATKŮ.....	26
8	ZÁVĚR.....	29
	POUŽITÁ LITERATURA.....	30

1 ÚVOD

V současné době, kdy pojem hutní podnik v sobě neskrývá jen hrubou a kvantitativní výrobu oceli, ale moderní provoz protkaný počítačem řízenými a automatizovanými provozy, je brán zřetel především na konkurenceschopnost. Ta dnes tkví, kromě pružné orientace vzhledem k poptávce, ve zvyšování efektivity práce, snižování nákladů výroby a především v kvalitě produkce. Dnes se ocel vyrábí převážně v závodech plynulého odlévání (tzv. ZPO) viz **obr. 1**, což je sice rychlý a efektivní způsob (ve srovnání s kokilovou výrobou), ale také mnohonásobně složitější a náročnější nejen na technické vybavení, ale i na kvalifikaci obsluhy. V tomto procesu se nachází mnoho uzlů, které ovlivňují kvalitu a stabilitu výroby.

Než se však pustíme do rozboru jednotlivých modelů, osvětlíme si alespoň v kostce charakteristiku plynulého lití hutního komplexu, například podniku ArcelorMittal a.s. Ostrava. Je v dnešní době velice úspěšný a patří ke světovému gigantu. Chystá se k rozsáhlé modernizaci v oblasti výroby oceli výstavbou konvertoru a rekonstrukcí ZPO1 pro výrobu kruhových předlitků o velkých průměrech. Pro zkvalitnění jakosti oceli chystá vystavět ke stávající pánvové peci i vakuovou pec, která nemalou měrou ovlivní kvalitu oceli. Touto investicí se podnik zařadí mezi moderní světovou jedničku ve výrobě oceli schopnou konkurovat v náročných podmínkách tržní ekonomiky. Pro udržení tohoto trendu je snahou využít zkušeností při modelování složitých tepelných procesů a promítnutí výsledků zpět do výroby ke zvýšení kvality na co možná nejvyšší úroveň.

Cílem předkládané bakalářské práce je popsat jednotlivé zařízení plynulého odlévání oceli se zaměřením na primární, sekundární a terciární chlazení, které se dle názoru mnoha odborníků v nemalé míře podílí na vzniku vad předlitků a tím snižování kvality produkce. Dílčím cílem této práce je nalézt možná řešení, shrnout zkušenosti z jiných podniků, uplatnit výsledky různých modelových programů k využití v samotném provozu pro odhalení vzniku vad a následném odstranění příčin jejich vzniku. Návrh optimalizace režimu chlazení vychází z analýzy aktuální zahraniční literatury orientované do oblasti matematického modelování teplotního pole plynule litého předlitku a jejich využití k verifikaci v praxi.



Obr. 1: Zařízení plynulého odlévání oceli [1].

2 TEORIE VÝROBY OCELI

Kapitola obsahuje základní teoretické poznatky z oblasti problematiky výroby oceli na zařízení plynulého odlévání a chlazení plynule litého předlitku v oblasti primární, sekundární a terciární zóny.

2.1 Hutnictví

Kovy lidstvo zná už odpradávná a ocel již několik tisíciletí. Je spjata snad se všemi klíčovými objevy Průmyslové revoluce od parního stroje, železnice, elektřiny, letadla, až k dnešním počítačům. Ukázka výroby oceli v polovině 19. Století je zachycena na **obr. 2**. Celosvětový význam hutnictví nelze popřít, ocel je druhým nejmasověji vyráběným produktem po cementu [2].

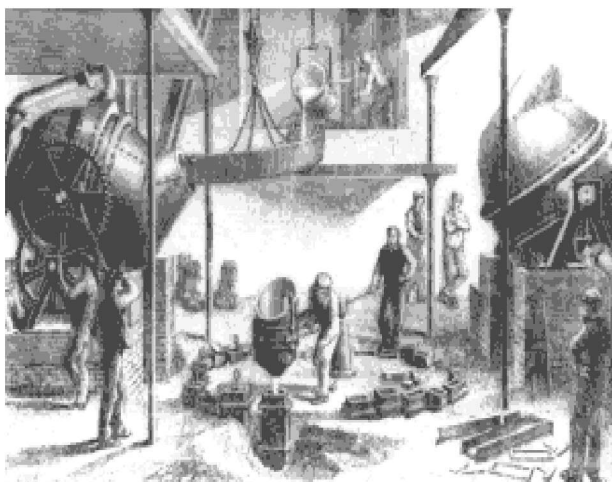
Co se týče naší republiky, v období po roce 1948 se Československo mělo stát pilířem těžkého průmyslu pro východní blok. Vznikaly velké závody, např. válcovna trub ve Veselí nad Moravou nebo integrované podniky, na Ostravsku – Nová huť nebo na Slovensku Východoslovenské železářny.

Vývoj průmyslu u nás směřoval ke kvantitě. Modernizace s kvalitou byly opomíjeny. Proto se také odlévala ocel převážně do kokil a plynulé odlévání, které již bylo ve světě 20 let běžné, se nepoužívalo.

V hutnictví pracovalo v r. 1988 téměř 170 tisíc lidí a vyrobilo se 15,8 mil. tun oceli. Do r. 1989 se investovalo především do nárůstu kapacit a výroby. Modernizace a zvyšování kvality byly až druhořadým úkolem. Poté se začal těžký průmysl omezovat. Příčinou byla snaha o ochranu životního prostředí, zpomalení devastace krajiny a názor, že bez těžkého průmyslu se lze obejít [2].

Naštěstí zvítězil zdravý rozum a těžký průmysl u nás úplně nezanikl. Začala se budovat zařízení plynulého odlévání oceli, srovnatelná se světovou špičkou. Hutnictví se i v těžkých dobách privatizací dokázalo udržet. Poslední těžkou zkouškou nejen pro průmysl, ale i pro všechny oblasti hospodářství byla světová krize v r. 2008 - 09, jejíž důsledky budou ještě dlouho doznívat.

Ve světě těžký průmysl zaznamenal několik stagnací, ale byly to jen odezvy na ropné krize v 80. letech minulého století a nasycený trh. To vedlo ještě více k integraci hutnictví, úsporám, modernizaci a zavádění nových technologií do výroby.



Obr. 2: Počátky hutní výroby [2].

Velký význam zaznamenal nástup Číny a Indie do světového hutnictví na počátku 21. století. Prvořadá se stala kvalita a uspokojování potřeb zákazníků, snaha všech ocelářských gigantů vytvořit nabídku nových druhů ocelí, převážně pro automobilový průmysl a dnes ve velké míře do stavebnictví, v nejlepší kvalitě a s co nejmenšími náklady. Proto je nutné přistupovat i k výrobě oceli jako k jemné, počítačem řízené a přesné práci s využitím dostupných modelových programů pro přesnou analýzu celého procesu lití a jejich plným využitím v praxi [2].

2.2 Výroba oceli

Ocel se vyrábí úpravou a legováním surového železa, které prochází redukčními pochody ve vysoké peci. Převáží se pomocí speciálních vagónů – Veronik na ocelárny k následnému zpracování v tavicích agregátech, kde je docíleno předepsaného chemického složení a teploty dle následného určení [3]:

- Pro kokilové lití: kovárny a válcovny.
- K plynulému odlévání oceli.

Druhy ocelářských agregátů:

- Kyslíkové konvertory
- Elektrické obloukové pece
- Tandemové pece (už jen v ArcelorMittal Ostrava a.s.)

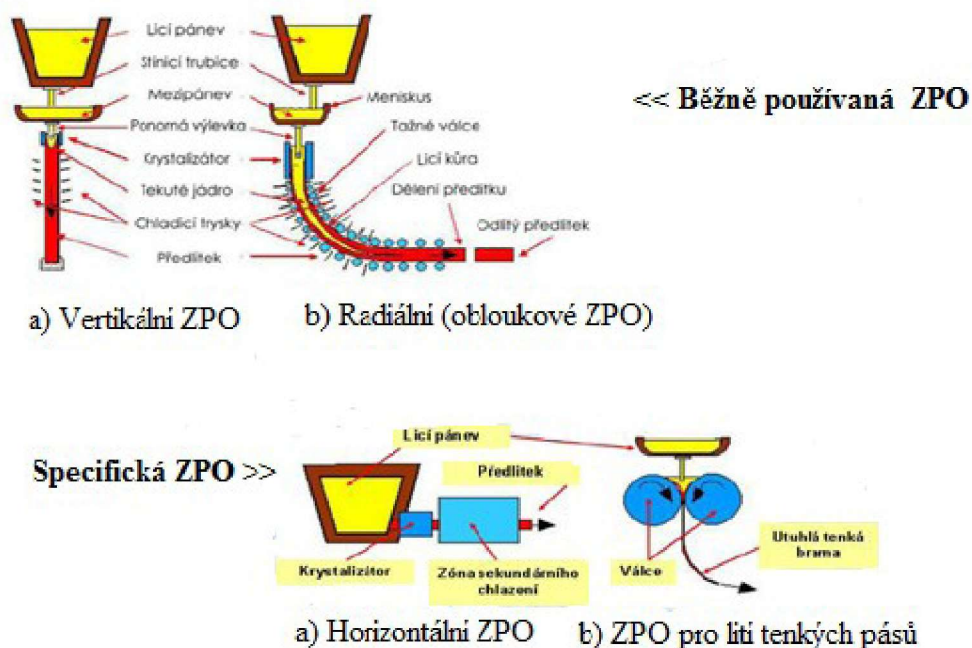
Z ocelářských pecí se odpichem do licích pánví ocel přepravuje převážecími vozy a vysokonosnostními jeřáby na jednotlivá zařízení, převážně však k plynulému odlévání oceli. Během přepravy licí pánve s ocelí na zařízení plynulého odlévání se však většinou ještě ocel zpracovává na pánvových elektrických pecích a zařízení sekundární metalurgie, ve kterých se upraví konečné chemické složení oceli dolegováním a ohřevem. Zbavuje se nečistot, homogenizuje a připravuje pro daný licí stroj [3].

2.3 Stručná charakteristika technologie plynulého odlévání oceli

Na rozdíl od kokilového lití, kde je ocel odlévána přerušovaně do jednotlivých kokil, princip plynulého lití spočívá v nepřerušované přeměně tekuté oceli v plynule tuhnoucí předlitek. Zařízení plynulého odlévání (ZPO) je velice náročný a složitý komplex, kde každá jednotlivá součást musí splňovat přesná kritéria k zabezpečení plynulosti a kvality produkované oceli. Základní součástí technologie je licí stojan, do kterého se umístí po dohotovení na pánvové peci licí pánve s tekutou ocelí. Konstrukčně je licí stojan řešen tak, že umožňuje pojmout dvě licí pánve a tím zabezpečit jejich plynulou výměnu bez přerušení lití. Pomocí deskového uzávěru ve spodní části se licí pánve otevře a přes krycí stínící trubici, bránící zpětné oxidaci proudu oceli, se tekutou ocelí plní mezipánve, umístěná pod licí pánví v mezipánvovém voze. Mezipánve umožňuje svým naplněním plynulý přechod jednotlivých licích pánví a tím sekvenční průběh, tzn. nepřetržitou výrobnost příslušného agregátu [4].

Prvotní a základní rozdělení zařízení plynulého lití podle směru odlévání znázorňuje **obr. 3:**

- VERTIKÁLNÍ: velké požadavky na prostor a konstrukci vodících válečků.
- RADIALNÍ: používá se s rovným i zakřiveným krystalizátorem, s různými poloměry zakřivení.
- HORIZONTÁLNÍ: pro menší ocelárny, velké nároky na těsnost a konstrukci krystalizátorů.



Obr. 3: Rozdělení ZPO podle směru odlévání [4].

Podle počtu výtokových uzlů jednotlivých mezipánví se ZPO dělí na:

- **jednoproudá**
- **dvou- a víceproudá**

Přehled u nás provozovaných ZPO s rozdělením podle počtu lících proudů ukazuje **tab. 1** [4].

Tab. 1.: Přehled ZPO v České republice [4].

Podnik	TŽ a.s.	TŽ a.s.	ArcelorMittal Ostrava a.s.	ArcelorMittal Ostrava a.s.	ArcelorMittal Ostrava a.s.	Evraz Vítkovice Steel a.s.
Typ ZPO	Blokové radiální	Sochorové radiální	Sochorové radiální	Brámové radiální	Sochorové radiální	Brámové radiální
Výrobce	CLESIM	CONCAST	MANNESMAN DEMAG	VAI	CONCAST	CLESIM
Uvedení do provozu	1990	1994	12/1993	11/1997	8/1999	6/1995
Počet proudů	6	8	6	1	6	1
Kapacita (t/rok)	800000	1200000	1100000	1100000	960000	720000

Většinou se používá k výtoku oceli z mezipánve výlevek s různými druhy uzavíracích a regulačních mechanismů. Existují ale i s licími kameny pro otevřené lité, kde se rychlost řídí pomocí hladiny v mezipánvi.

Ocel z mezipánve protéká přes výlevku do krystalizátoru, který jako nejdůležitější článek celého stroje udává tvar a celkovou strukturu přechodu z kapalné fáze do počátku postupného tuhnutí oceli od licí kůry směrem ke středu ocelového předlitku.

Krystalizátory patří k základním pilířům celého ZPO. Krystalizátory převádějí pomocí primárního chlazení tekutou ocel v plastickou, kde na povrchu litého sochoru vytvářejí licí kůru a velkou měrou se podílejí na budoucí kvalitě produkce [5].

Tvar vložky krystalizátoru umožňuje vytvářet předlitky různých tvarů a rozměrů:

- **čtvercové,**
- **kruhové,**
- **bramy** (strany o různých rozměrech),
- **speciální** (složitější tvary).

V krystalizátoru je ocel pomocí snímacího zařízení, spojeného s regulací výtoku udržována na určité - předem dané úrovni. Na ocel se sype krycí a mazací struska (licí prášek), která slouží k udržování teploty, brání reoxidaci a má funkci maziva mezi stěnou krystalizátoru a licí kůrou předlitku. Vytváří také přemostění při odvodu tepla. Dalším nástrojem bránícím ke spojení oceli s vložkou krystalizátoru je jeho vlastní oscilace (frekvenční pohyb) nahoru a dolů, která je řízena v závislosti na rychlosti lité [3].

Krystalizátor a vliv primárního chlazení je také základní článek vzniku povrchových a podpovrchových vad. Pod krystalizátorem také dochází k největšímu problému provázejícímu plynulé lité oceli, a to ke vzniku průvalu, což představuje protržení licí kůry, vytečení tekutého jádra mimo skořepinu a zalití části stroje. Průval představuje pro výkonnost stroje velkou hrozbu. Jeho vzniku a omezení je věnováno mnoho studií.

Po opuštění krystalizátoru je předlitek v plastickém stavu dopravován pomocí pohybových stolic po pohyblivých válcích a za soustavného sekundárního chlazení k dělicím strojům, které upraví předlitek na požadovanou délku. Pomocí různých krokovacích zařízení jsou jednotlivé předlitky dopraveny na chladníky, jakožto forma terciárního chlazení, kde se po určitou dobu dochlazují okolní atmosférou nebo pomocí foukaného vzduchu. Pak jsou postupně nakládány na soupravy vagónu, kterými se převáží k dalšímu zpracování na jednotlivé válcovny.

Dnes existují již komplexy, tzv. MINIHUTĚ, kde je válcovna součástí příslušného ZPO a stroj opouští již hotový smotaný pás plechu, jak lze vidět na **obr. 4**. Vývoj směřuje ke konstrukcím s přímým válcováním a odlévání tvarů, které se co nejvíce blíží výrobku [4].

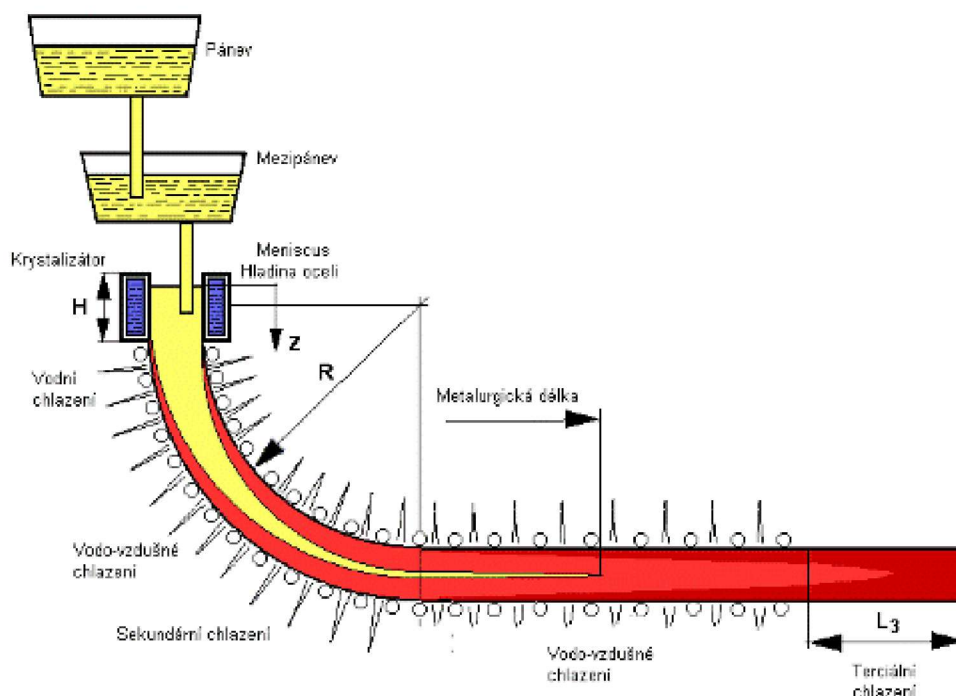


Obr. 4: Hotový smotek plechu z komplexu MINIHUTĚ připravený k expedici [1].

2.4 Technologie chlazení plynule litých ocelových sochorů

Od krystalizátoru až po samotnou nakládku je předlitek chlazen ve třech stupních, jak je zřejmé z **obr. 5** [3]:

- **Primárním** – krystalizátor
- **Sekundárním** – vnější ostřík médiem
- **Terciárním** - vzduch, atmosféra

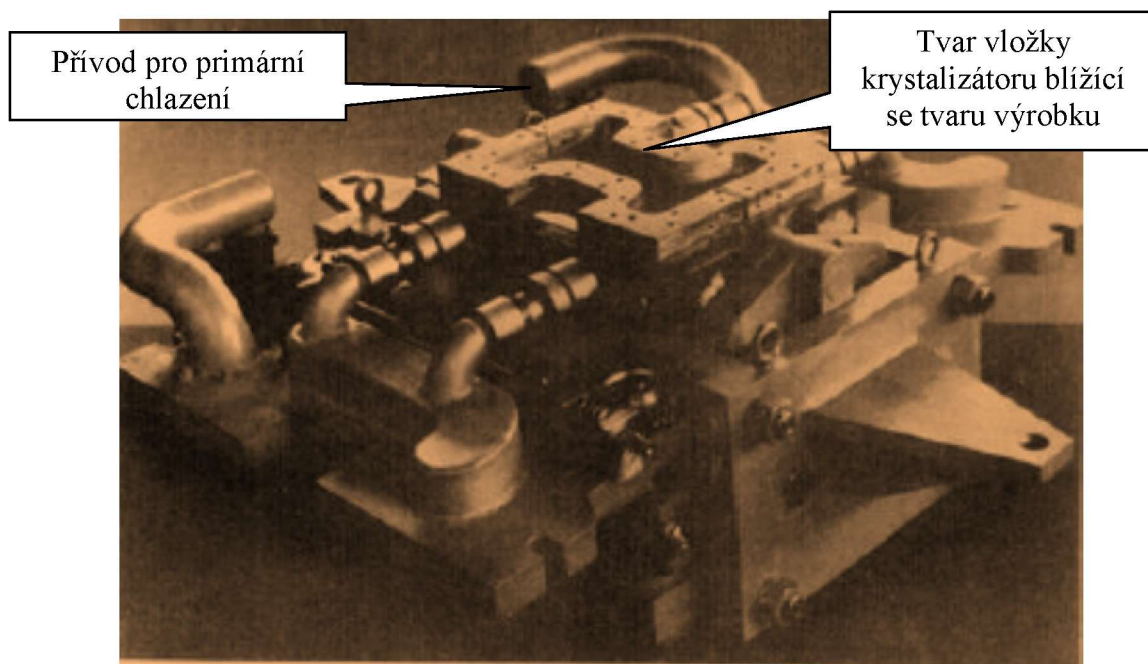


Obr. 5: Schéma postupného chlazení ocelového předlitku [3].

2.4.1 Primární chlazení

Krystalizátor představuje základní pilíř lícího stroje. Složitá konstrukce je zřejmá z **obr. 6** [4]. Převážně se skládá z těla krystalizátoru a měděné vložky, která se vyznačuje vysokou tepelnou vodivostí. S ohledem na styk vložky krystalizátoru s tekutou ocelí je potřeba zajistit dostatečné chlazení vnějšího povrchu vložky. To zabezpečuje primární chladicí okruh, který má dvě základní funkce. Ochránit vložku krystalizátoru před vlivem tekuté oceli a zároveň zchlazení jejího povrchu s vytvořením počáteční lící kůry plynule litého sochoru.

Systém primárního chlazení je konstruován jako uzavřený okruh, ve kterém je chemicky upravená kapalina o určité teplotě vedena ke stěnám vložky krystalizátoru, kde odebrané teplo odvede ven z krystalizátoru. Sledovaná hodnota chlazení je dána rozdílem teplot na vstupu a výstupu tzv. hodnotou Δt , kterou lze regulovat změnou průtoku kapaliny přes jednotlivé krystalizátory. Změna Δt v průběhu lití může být signálem vzniku nestandardních jevů, jako je nedostatečné mazání lícího prášku, či průvalu při lití [6].



Obr. 6: Konstrukce moderních krystalizátorů [4].

2.4.2 Sekundární chlazení

Předlitek opouští krystalizátor jen s tenkou povrchovou slupkou a tekutým jádrem, které mnohdy dosahuje tzv. metalurgické délky kolem 20 m, než sochor utuhne v celém profilu. Proto druhý stupeň chlazení (tzv. sekundární zóna) má takový vliv na vznik vad a středové segregace [5].

Hlavní požadavky na sekundární chlazení [5]:

- **rovnoměrnost,**
- **intenzita,**
- **krátká doba kontaktu kapaliny s předlitkem,**
- **regulovatelnost intenzity chlazení v závislosti na rychlosti lití.**

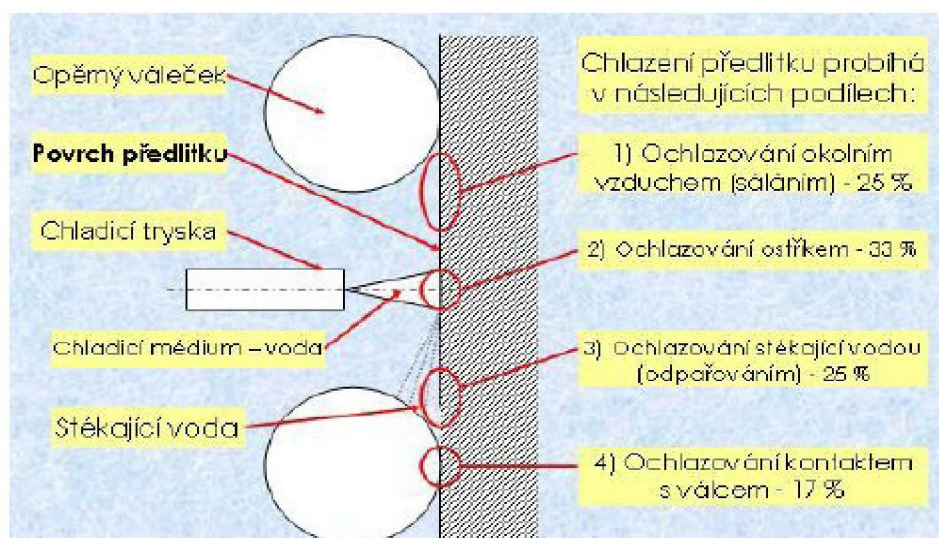
To znamená, že chlazení předlitku by mělo odvádět konstantní množství tepla, zachovávat stálou teplotu předlitku a tím dodržovat stejnou délku tekutého jádra, tzv. konstantní požadovanou metalurgickou délku **obr. 5** [5].



Obr. 7: Konstrukce trysek [7].

K chlazení se používá přímý ostřík přes speciální trysky, umožňující plošný rozstřík, vodou nebo vodovzdušnou emulzí **obr. 7**, kde lze vidět konstrukci moderních trysek pro sekundární chlazení, které v dnešní době vyrábí a dodává například celosvětová firma Hennlich [7].

Schéma chlazení předlitku po opuštění krystalizátoru schematicky znázorňuje **obr. 8** [4].



Obr. 8: Ukázka průběhu chlazení předlitku po opuštění krystalizátoru [4].

2.4.3 Terciární chlazení

Do tohoto chlazení lze zahrnout zařízení pro odsun předlitku s vestavěným chladicím systémem, odvod tepla do okolního vzduchu převážně sáláním a v malé míře přirozenou konvekcí. Počítá se zde i přenos tepla vedením do vodících tažných a rovnacích válců, či chladicího lože [5].

Chladicí lože provádí, jak vidíme na **obr. 9** [6], posun jednotlivých sochorů většinou pomocí soustavy roštnic s výřezy a pohyb je konán převalováním, což umožňuje udržovat rovinnost jednotlivých sochorů. Proto je důležité dodržovat plynulost celého procesu. Bylo pozorováno, že pokud se proces přerušil a jednotlivé předlitky byly ponechány delší dobu v jedné poloze, došlo k jejich prohnutí, převážně pokud vzduchové chlazení používané na některých ZPO bylo jednostranné.

Nejvíce lze zakřivení pozorovat u kulatých předvalků, které jsou nejvíce náchylné ke vzniku povrchových, podpovrchových vad a trhlin [6].



Obr. 9: Roštnice chladicího lože [1].

3 VADY PLYNULE LITÝCH OCELOVÝCH SOCHORŮ

Vad plynule litých ocelových sochorů je celá řada a lze je rozdělit podle mnoha aspektů. Známe tři základní vyskytující se vady [4]:

- rozměrové a tvarové vady,
- povrchové vady,
- vnitřní vady.

3.1 Vady vznikající v závislosti na chlazení

Na vznik vad má vliv celá řada faktorů. Od přípravy tekuté oceli a jejího složení, teplotu předehřátí, použití a kvalitu liciho prášku, výšku hladiny v krystalizátoru, tvar vložky krystalizátoru, až po jednotlivé složky chlazení.

Chlazení předlitku a tím odvod tepla má ovšem na vznik vad nesmírný význam. Nesprávným chlazením vznikají především vnitřní trhliny a středová pórovitost, která je nejvíce ovlivňována měkkým a nestejnoměrným sekundárním chlazením [4].

Tyto vady se většinou projeví až při válcování na válcovnách, dochází k reklamám, sešrotování i celých taveb a tím k mnohamiliónovým škodám. Převážně k těmto vadám dochází na kulatých předlitcích, které pro svou specifickou jsou ke vzniku vad náchylnější, než jiné tvary sochorů, jak lze pozorovat **obr. 10** [6].



Obr. 10: a) Vnitřní trhliny kruhového předlitku b) Rozválcované podélné trhliny [1].

Proto se snaží všichni výrobci oceli vady eliminovat. Tento proces je však velice složitý. Děje, které vlastnosti předlitku ovlivňují, probíhají za vysokých teplot uvnitř předlitku a získat potřebné informace ještě v průběhu lití je velice těžké.

Z toho důvodu v poslední době vznikají projekty, které se snaží získat ucelený soubor nových poznatků o fyzikálněchemických a termofyzikálních vlastnostech oceli, transportu tepla v krystalizátoru a oblasti sekundárního chlazení, krystalizačních a segregačních dějů a vlivu technologických faktorů na tvorbu vad předlitků. Projekty se snaží propojit badatelské týmy s praktickou realizací s ohledem na potřeby a možnosti jednotlivých ZPO. Projekty pak tvoří základnu pro uplatnění moderních technologií a nejnovějších poznatků v metalurgii [8].

Jednou z možností, jak získat ucelený soubor informací, je využití metody matematického modelování.

4 MODELOVÁNÍ

Modelování se opírá o teorii podobnosti zkoumaných dějů. Experimentálním zkoumáním díla se snažíme k němu přiřadit podle určitých pravidel jiný systém, model. Při řešení úkolu modelem nahrazujeme dílo a snažíme se získat nové poznatky v situacích, kdy nelze experiment sledovat přímo [9].

4.1 Model, modelování, druhy modelů

Modelů existuje celá řada a rozdělit je můžeme podle mnoha hledisek. Například dle druhu systému [9]:

- **Fyzikální model:** je tvořen na základě fyzikální podobnosti hmotným systémem.
- **Matematický model:** je tvořen na základě matematické podobnosti nehmotnou soustavou rovnic.

Zkoumáme-li charakter procesu vzniku modelu, lze je rozdělit na:

- **Deterministický model:** dokážeme deterministicky (jednoznačně) přiřadit a popsat vstupní a výstupní veličiny.
- **Stochastický model:** pracujeme s pravděpodobnostními a statistickými vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami.

Modely lze dále rozdělit podle mnoha kritérií a charakteristik. Například na úplný, neúplný, přibližný, což jsou vlastně skoro všechny modely. Nikdy nelze dosáhnout přesné shody s dílem. Dále máme modely **lineární, nelineární, řídicí, řízené, neřízené** a mnoho dalších [10].

Pro použití v podmínkách napodobení procesů v oblasti tepelné techniky používáme rozdělení podle určení, či vzniku modelu na [10]:

- **Analytické modely:** což jsou v podstatě zjednodušené matematické modely, které musí být v souladu se zachováním věrohodnosti zkoumaného procesu. Teplota se řeší jako funkce souřadnic a času. Tyto modely mají v tepelné technice omezené použití, lze je využít jen pro lineární úlohy s lineárními okrajovými podmínkami.

Základní analytické metody pro řešení tepelných procesů jsou:

- separace proměnných (tzv. Fourierova metoda)
- metoda Greenových funkcí
- **Experimentální modely:** v tepelné technice známé také jako izotermické, využívá se k jejich vytvoření hodnot a poznatků z experimentů prováděných na skutečném díle. Mohou to být také modely spojené a různě kombinované.

S rozvojem počítačové techniky se začaly vytvářet programy, které dokážou napodobit určitý proces, či vytvořit abstraktní obraz situace, či výrobku. Tyto programy již obsahují matematické modely a algoritmy jejich řešení a po zadání potřebných vstupních informací zobrazují například modely, neboli simulace teplotních dějů i v podmínkách, které nelze na reálných zařízeních vytvořit z důvodu poškození stroje nebo ohrožení bezpečnosti při daném procesu. K řešení rovnic zkoumaného systému (numerického modelu) využívají komerční software numerické metody. Princip řešení pomocí **numerické metody** spočívá

v pokrytí zkoumané oblasti výpočetní sítě a hledání diskrétního řešení v těchto dostatečně malých podoblastech základní geometrie pomocí systému tzv. diferenčních (algebraických) rovnic. Mezi dnes nejvíce používané numerické metody se řadí metoda konečných diferencí, metoda konečných objemů a metoda konečných prvků. U těchto metod je potřeba opakovat značné množství algebraických operací daného typu, což je matematicky velice náročné, ale pro moderní počítač to neznamena žádnou překážku [11].

4.2 Využití modelů k optimalizaci plynulého lití

Celý proces odlévání oceli a tím samozřejmě i každý článek od zpracování až po samotné lití je velmi důležitý pro výrobnost, ale také pro kvalitu požadovaných předlitků. Jednotlivé součásti procesu na sobě závisí a ovlivňují se. Avšak největší důraz v dnešní době je kladen na konstrukci krystalizátoru a s tím související primární, dále pak navazující sekundární a terciární chlazení. Ve spojení se složením oceli a rychlostí lití se počátek vzniku dvoufázového rozhraní ocelového sochoru a s ním spojené teplotní pole velkou mírou podepisuje na vzniku povrchových a podpovrchových vad [12].

Proto je prvořadým úkolem a snahou napodobit tento proces různými modely, ať už analytickými či izotermickými a použít tyto modely pro následnou optimalizaci procesu lití a tím dosáhnout požadované kvality v závislosti na co nejvyšší výrobě.

Proces samotného lití a chladnutí předlitku, tím vytvoření určité délky tekutého jádra, tzv. metalurgické délky plynule litého sochoru, má nesmírný vliv na strukturu hotového předlitku, ale je pro přímé sledování nerealizovatelný, nebo za velkých obtíží. Jak už znemožněným přístupem k samotnému předlitku z důvodu vysokých teplot, tak i z hlediska bezpečnosti celého procesu. Také nelze při přímé výrobě používat experimenty, které svými zásahy do průběhu lití by stroj vystavili poruchám, či zapříčinily zastavení, popř. zničení stroje.

Proto za pomoci různých modelů se snažíme daný proces zobrazit, představit si, jak asi probíhá. Obrovskou výhodou modelu je, že aniž bychom ohrozili daný proces, možnost zjistit údaje o dějích, které by mohly probíhat na samé hranici únosnosti a bezpečnosti stroje.

Samotný matematický model nemůže zohlednit všechna možná úskalí procesu lití, proto je snahou různé modely kombinovat, či zapojit do tvorby všechny možné a dostupné praktické hodnoty, poznatky a měření. Vzájemným srovnáváním se tak dopracovat co nejvíce k reálným hodnotám a ty pak uplatnit v samotném procesu lití optimalizací vstupních podmínek a tím ovlivnit či zamezit vzniku vad nebo havárií liciho stroje [5].

4.3 Metody řízení ZPO

Co nejlepších výsledků v oblasti plynulého odlévání oceli a zároveň zachování nejvyšší úrovně bezpečnosti lze dosáhnout pouze řízeným a následně automatizovaným systémem procesního řízení [13].

Základní úkol řízení spočívá ve vytvoření databáze a sběru všech dostupných informací ze všech oblastí potřebných k bezpečnému a plynulému lití, vyhodnocování, zjištění možných propojení mezi snímanými a řízenými parametry a jejich zpětné využití formou regulace ve všech oblastech liciho stroje [12].

S využitím moderních a velice výkonných počítačů v oblasti řízení ve spojení s dostupnými daty můžeme vytvářet modelové situace již v průběhu lití tzv. on-line modely, které již v reálném čase procesu dokážou vyhodnotit situaci, zpětně reagovat korekcí

parametrů a tím předcházet poruchám stroje, například vzniku průvalu sochoru či vzniku vad předlitků.

Co se týká komplexního řízení výrobnosti oceli, je nutná spolupráce všech složek technologie výroby oceli. To znamená jejich propojení a centrální řízení. Většinou propojení a organizace celého systému se provádí formou koordinace z dispečerského stanoviště, kde se sbíhají všechny důležité uzly hutního podniku. Lze říci, že se zde berou v úvahu informace od počátku požadavků zákazníků, plánování výroby s požadavkem na výrobu a zajištění vstupních komodit, jejich doprava až po výrobu požadovaného sortimentu v časovém harmonogramu s následným exportem k zákazníkům. Úkolem dispečerského řízení je pružně reagovat na odchylky od plánovaných požadavků, odstraňování následků havárií a poruch jednotlivých výrobních složek a koordinovat celkový chod průběhu reálného procesu.

S příchodem moderních počítačů lze celý proces centralizovat a zapojit fungující model, který dokáže sám vyhodnotit nestandardní situace a vytvořit následný postup k snížení ztrát ve výrobě na co nejmenší možnou míru. Omezuje také vznik pochybení lidského faktoru [13].

Příkladem je realizace expertního systému G2 v řídicím systému ocelárny společnosti ArcelorMittal a.s. jak je patrné z **obr. 11** [13].



Obr. 11: Schéma činnosti plánovacího modulu ocelárny a jeho komunikace s okolím [13].

5 TEPLOTNÍ POLE

Teplotní pole je základní parametr zkoumání při plynulém lití oceli. Zaobírá se změnou teploty za určitý čas, s tím spojenou změnou stavu oceli v průběhu fázových přeměn mezi tekutou a pevnou fází **viz obr. 12** [14].



Obr. 12: Teplotní pole kontislitku, ve spodní části oblast solidu a likvidu [14].

5.1 Matematické modely teplotního pole plynule odlévaných předlitků

Stanovení teplotního pole předlitku, a tím tloušťky licí kůry na výstupu z krystalizátoru v závislosti na chemickém složení, rychlosti lití a odvodu tepla má zásadní vliv na kvalitu předlitku. Vyžaduje především znalost součinitelů přestupu tepla α v krystalizátoru a pásnu sekundárního chlazení. Proto se výpočty zaměřují na celé pásmo chlazení od krystalizátoru až po terciární zónu [5].

Přesný výpočet však z důvodu elasticko-plastické deformace tuhnoucí kůry vlivem teplotního gradientu a ferostatického tlaku není možný. Dalším ovlivňujícím faktorem je nepravidelná tloušťka licí kůry, ovlivněná vznikem mezery mezi stěnou krystalizátoru a předlitkem vlivem smršťování sochorů během chladnutí, dále pak konicitou vložky krystalizátoru a jeho oscilací. Mezi další, velmi významný ovlivňující faktor, patří množství a druh licí strusky.

Vzhledem k velké náročnosti procesů měření tepelné účinnosti v jednotlivých pásmech se vychází při výpočtech matematických modelů ze známých hodnot součinitele přestupu tepla. Přehled odvodu tepla v jednotlivých pásmech [5]:

- **Krystalizátor: 20 – 40%**
- **Sekundární chlazení: 40 – 55%**
- **Terciární chlazení: 20 – 30%**

Pro vytvoření matematického modelu musíme také znát hodnoty součinitele tepelné vodivosti odlévané oceli, materiálu krystalizátoru a měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě. Při výpočtech se jednotlivá pásma dělí v závislosti na zjištěných rozdílech hodnot součinitele přestupu tepla. Krystalizátor na tři, sekundární zpravidla na čtyři až pět sekcí. V ojedinělých případech se součinitele přestupu tepla v krystalizátoru stanoví experimentálně, ale bývá to těžko realizovatelné. Výsledky matematického modelu jsou v tomto případě zcela dostačující.

Matematický model lze díky své univerzálnosti přizpůsobit na různé typy ZPO, avšak má také své nevýhody. Zadání vstupních informací musí být dokonalé, aby výsledek ve formě výstupu teplotního pole byl rovněž dokonalý. V mnoha případech tuto podmínku nelze dodržet z důvodu neznalosti některých procesů během lití a tuhnutí předlitku. Komplikované zadávání vstupních informací celý proces zpomaluje a stává se neekonomickým. Proto se pomocí matematických modelů řeší především dílčí problémy a dle výsledků se zváží pokračování v řešení celého problému [5].

6 ANALÝZA AKTUÁLNÍ CELOSVĚTOVÉ LITERATURY

V dnešní době již existuje celá řada experimentálně vytvořených modelů technologických procesů probíhajících při plynulém liti ocelových předlitků, které se již jen obvykle na základě zjištěných dílčích měření zdokonalují a upravují. Největší problém tkví v tom, že nelze vytvořit univerzální model použitelný pro většinu zařízení plynulého liti, ale každé ZPO je svým způsobem originální. Přes tyto problémy se však podařilo vytvořit v posledním desetiletí desítky „dokonalých“ modelů a pomocí výkonných počítačů mnoho zdařilých simulací, které napomohly zlepšit kvalitu a efektivnost výrobních technologií plynulého liti. Na téma teplotních procesů v jednotlivých zónách plynulého liti je zpracováno mnoho článků a literatury, ale z důvodu velice složitých podmínek výzkumu se v malé míře podaří vytvořit v této oblasti něco nového.

I tak v poslední době vzniklo mnoho projektů za pomoci nových trendů v modelování a získání přesnějších informací z některých provedených experimentů v oblasti teplotních zón jednotlivých oblastí chlazení. Některé z nich stojí za zmínku [12].

6.1 Metody stanovení teplotního pole

R. Manojlovič a V. Jašovski [15] popisují dvě metody stanovení teplotního pole plynule lité bramy: numerickou metodou (s využitím naměřených teplot) a tzv. izotermickou metodu. Teploty byly měřené uvnitř plynule lité bramy, přičemž byl využit wolfram-rheniový termočlánek. I když detaily zajímavé metodiky měření teplot nejsou z příspěvku zřejmé, z dostupných zdrojů víme [16], že s termočlánekem na bázi wolframu a rhenia lze měřit teplotu až do cca 2300 °C. Protože se čistý wolfram vyznačuje vysokou křehkostí, přidává se do pozitivní větve termočlánků rhenium, které zlepšuje mechanické vlastnosti termočlánku. Využívá se termoelektrického jevu, kdy dochází k přeměně tepelné energie na elektrickou, a na styku dvou různých kovů vzniká mezi nimi rozdíl kontaktního potenciálu. Matematické modelování teplotního pole plynule litých sochorů či bram se většinou opírá o výsledky měření teplot na jejich povrchu. Velmi zřídka se lze opřít o výsledky měření přímo uvnitř plynule litého proudu a tak získat přesné informace o průběhu tuhnutí. Proto je tento příspěvek zajímavý v rámci této práce.

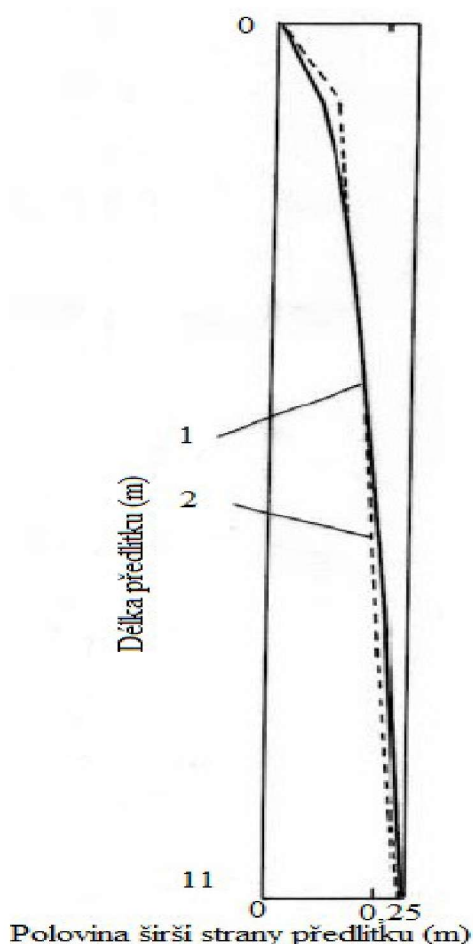
V analytické (izotermické) metodě byla použita pro počáteční diferenciální rovnici tzv. Greenová funkce. Čas byl stanoven v mezích skutečného tuhnutí. Interval charakterizující součinitel tepelné vodivosti bylo možno měnit. S využitím izotermické metody byl odhadnut tvar oblastí iso-solidů a iso-likvid v podélném směru plynule lité bramy, podíl délky tekutého jádra, dále byla odhadnuta tloušťka utuhlé kůry na užší a širší straně bramy, a oblasti pevné, tekuté a přechodové oblasti v příčných směrech bramy.

Výsledky použití obou metod jsou prezentovány formou tabulky, kde jsou uvedeny výsledky tl. utuhlé kůry v závislosti na délce bramy, a to pro užší a širší bramu – viz **tab. 2**. Jak je patrné, bylo dosaženo velmi dobré shody mezi oběma metodami.

V závislosti na parametrech odlévání se tloušťka licí kůry na vnitřní straně předlitku pohybovala v rozmezí od 23 do 37 mm, experimentálně byla určena 32 mm, numerickou metodou byla určena 34 mm a izotermickou metodou byla stanovena na 39 mm. Tloušťka licí kůry odhadovaná izotermickou metodou se odchyluje od tloušťky licí kůry získané ostatními metodami zvláště na širší straně předlitku při počátku tuhnutí. Na **obr. 13** je grafické srovnání tloušťky licí kůry numerickou metodou (**křivka č. 1**) a izotermickou metodou (**křivka č. 2**), kde je zřejmý rozdíl [15].

Tab. 2: Tloušťka licí kůry získaná numerickou a izotermickou metodou [15]

Metalurgická délka (m)	Tloušťka licí kůry (m), použitá metoda			
	Užší strana předlitku		Širší strana předlitku	
	Numerická	Izotermická	Numerická	Izotermická
	0	0	0	0
1	0,034	0,039	0,044	0,078
2	0,057	0,063	0,132	0,149
3	0,070	0,072	0,232	0,246
4	0,079	0,078	0,329	0,334
5	0,084	0,084	0,396	0,412
6	0,094	0,089	0,461	0,458
7	0,103	0,099	0,513	0,523
8	0,111	0,102	0,571	0,578
9	0,116	0,109	0,639	0,643
10	0,120	0,116	0,702	0,699
11	0,123	0,122	0,741	0,731
11,65	0,125	125	0,775	0,775

**Obr. 13:** Tloušťka licí kůry na užší straně předlitku [15]:

- 1 – křivka získaná pomocí numerického modelu.
- 2 – křivka izotermického modelu.

Z daného příspěvku [15] je zřejmé, že úpravou již existujících modelů a úpravou vstupních hodnot o zjištěné údaje z měření uvnitř oceli pomocí wolfram-rheniového termočlánku se lze velice přiblížit skutečné podobě teplotního pole uvnitř předlitku a vyjádřit ho také graficky.

To je velice důležité pro další výzkum teplotního pole a možnost tak ovlivňovat průběh tuhnutí předlitku a tím také kvalitu s ohledem na vznik vad vznikajících v průběhu lití.

Také se prokázalo, že údaje o teplotě měřené na povrchu předlitku jsou zkreslené, což zapříčiňuje především okraje vznikající na povrchu, pára ze sekundárního chlazení a další vlivy, které dané měření ovlivňují.

Na základě porovnání výsledků teplotních polí získaných z numerického modelování a izotermické metody bylo zjištěno, že lze izotermickou metodu využívat v matematickém modelování procesu tuhnutí plynule litého předlitku [15].

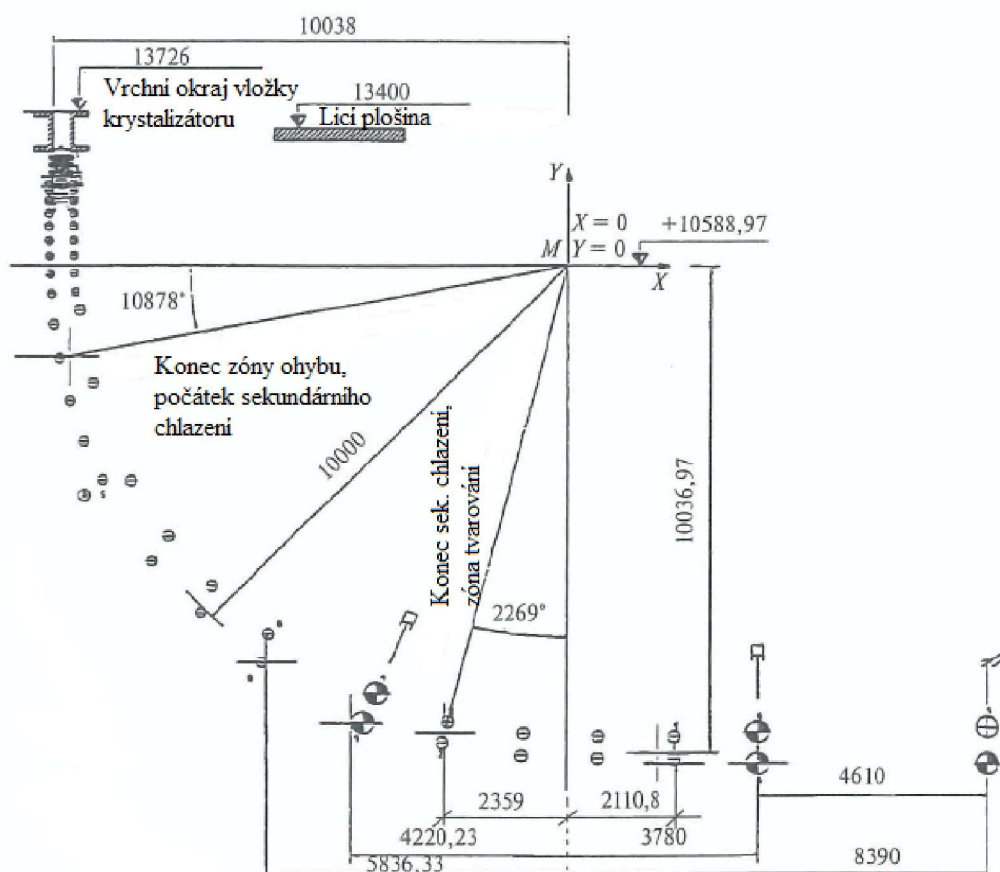
6.2 Použití modelů při rekonstrukci ZPO

A.V. Šapiro; V.B. Gankin et. al. v článku [17] řeší problematiku rekonstrukce stávajícího vertikálního ZPO s cílem odlévat kulaté sochory v průměru 200, 160 a 140 mm pro následné využití k výrobě bezešvých trubek. Byly hodnoceny dvě různé varianty rekonstrukce.

První varianta počítala s ponecháním stávajícího proudu ZPO, tzn. přímý krystalizátor, svislý úsek vodících válečků, postupný přechod v zónu ohybu o poloměru ($r = 10\text{ m}$) a horizontální úsek.

Druhá varianta spočívala v přebudování ZPO na radiální typ, tzn. zakřivený krystalizátor ($r = 12,5\text{ m}$) s válečkovým vedením, dvoubodový plynulý ohyb proudu ($r = 12,5\text{ m}$ a $r = 15,77\text{ m}$). V první části článku se autoři věnují rozboru krystalizátoru, jako nejdůležitější části celého systému plynulého lití. Na jeho tvaru a konstrukci bude záležet rozsah plánované rekonstrukce.

Schéma výchozího stavu lícího stroje je patrné z **obr. 14** [17].



Obr. 14: Schéma vodících válečků jednotlivých zón ZPO v Běloruském metalurgickém závodu pro rekonstrukci podle první varianty [17].

6.2.1 Rekonstrukce krystalizátorů

Odvod tepla v krystalizátoru lze rozdělit na dvě zóny [17]:

- **Horní část** – odvod tepla je zde limitován kontaktem předlitku přes lici prášek ke stěně krystalizátoru (min. tloušťka vzduchové mezery);
- **Spodní část** – minimální součinitel přestupu tepla (větší vzduchová mezera mezi vytvořenou kůrkou a stěnou krystalizátoru). Dochází zde k nárůstu teploty a ztenčení lici kůry, což má za následek riziko vzniku průvalů, povrchových a podpovrchových vad.

V horní části se určuje chování lici kůry sochoru konicitou a termickou deformací předlitku. V této souvislosti se zvláštní pozornost věnuje výběru konstrukce vložky v její vrchní části. V ní při lití může vzniknout oválnost sochoru z důvodu různé tloušťky, dané různou hodnotou plynové vůle, což je spojeno s vlivem celé řady tepelných a fyzikálních vlivů. Při výrazné oválnosti a nesprávně zvolené konicitě vznikají vnitřní radiální trhliny ve vzdálenosti 3 – 20 mm od povrchu kruhového sochoru, které se v nejzávažnějším případě rozvíjejí do venkovních podélných prasklin **viz obr.10 b)** [6, 17].

Výsledky rozboru teplotního pole vložky krystalizátoru pro odlévání kulatých sochorů dovolily porovnat vzdálenosti od menisku v krystalizátoru, při kterém je tepelný odpor plynové mezery (vůle) R3 (varianta s radiálním ZPO) stejný jako u vrstvy formujícího se předlitku R_c (stávajícího ZPO). Tato vzdálenost od menisku činí 200 – 300 mm při odlévání sochorů nejvyšší rychlostí až 3,5 m.min⁻¹. Získané výsledky byly zohledněny při projektování vložky pro rekonstrukci krystalizátoru ve Volžském závodu.

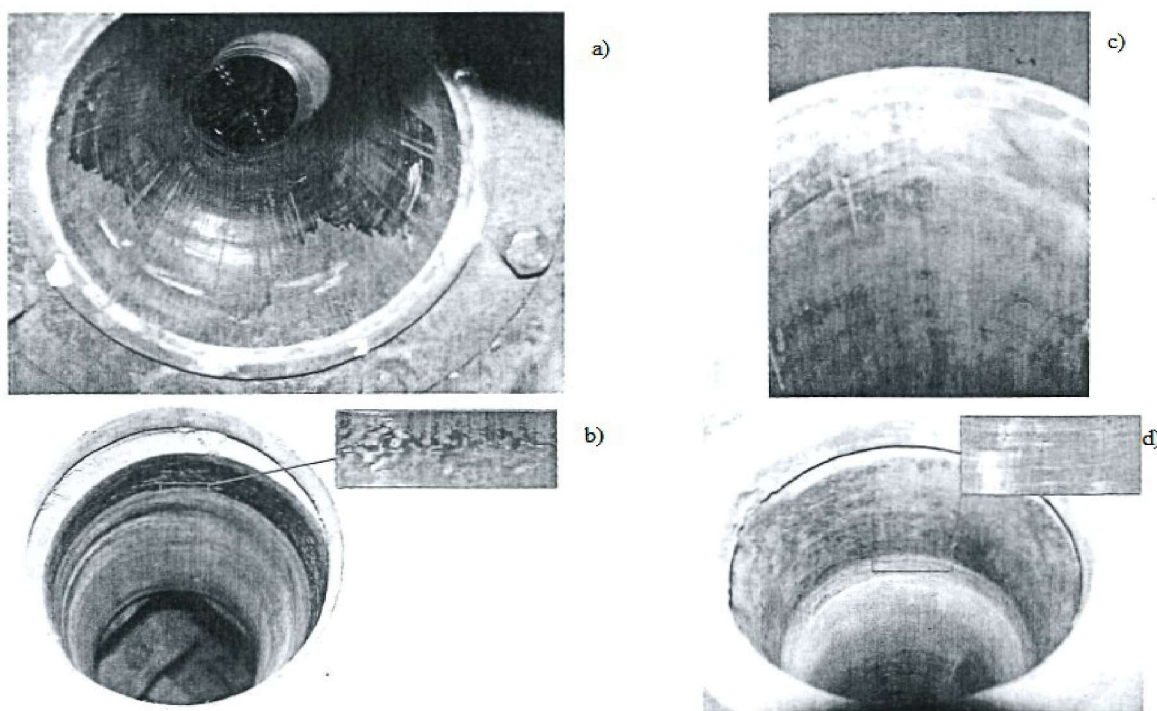
V první fázi tedy bylo zjištěno, že teplotní pochody v krystalizátoru jsou shodné pro vertikální i radiální ZPO a krystalizátor byl řešen jako samostatný úkol. Nicméně pro radiální ZPO je nutno vyrobít vyhovující krystalizátor pro kruhové sochory a také nové krystalizátory pro stávající profily bloků 250 x 300 mm a 300 x 400 mm.

Spolupráce s firmou SMS-Demag, která již projektovala vložky krystalizátorů na ZPO č. 1 v tomtéž závodě, přinesla pozitivní výsledky.

Krystalizátory pro malorozměrné předlitky, které se provozují v základě bez jakékoliv přísné kontroly rozložení vodících zařízení, jsou zvláště vystaveny opotřebení vlivem otěru. Největším termickým zatížením prochází meniskus vložky krystalizátoru, kde probíhá maximální teplotní tok.

Autoři navrhli jednovrstvé pochromování, které počítá s geometrií vnitřní dutiny kruhové vložky. Na části maximální vydutosti vložky dochází k největšímu otěru, které vede k mechanickému opotřebení povrchu. Na základě těchto poznatků byl upraven povrch vložky krystalizátoru pochromováním v různých tloušťkách. Ve vrchní části menisku provedli úpravu galvanickým pokovováním v tloušťce 70-100 μm a postupně se zvyšuje směrem k podélné ose. Ve spodní části je jednovrstvé pokovení, přičemž max. tloušťku na dané části dosahuje 150-200 μm a postupně se snižuje k hranici ohybu na 120 μm.

Modernizace krystalizátorů firmy SMS-Demag umožnila řešit úkoly, spojené s navýšením rychlosti lití a zlepšení kvality plynule litých kruhových předlitků. Návrhy na korekci galvanickým pochromováním umožnily dosáhnout dobré odolnosti vložek krystalizátoru proti opotřebení, jak je patrné z **obr. 15** [17].



Obr. 15: Opatřebení stěn ve spodní části vložky na úrovni menisku krystalizátoru při liti předlitků o průměru 156 mm [17]:

a); b) – stávající konstrukce vložky krystalizátoru na ZPO č. 2

c); d) – konstrukce od firmy SMS-Demag pro ZPO č.1 (po provedení úpravy povrchu vložky galvanizací s ohledem na geometrii vnitřní dutiny a odlití 150ti taveb)

6.2.2 Zóna ohybu s vlivem sekundárního chlazení na ovalitu předlitku

Je zřejmé, že ohyb předlitku způsobuje nevelkou ovalitu. Značně větší vliv má odchylka od souměrného ochlazení v krystalizátoru, nepřesné rozložení trysek s průtokem vody v pásmu sekundárního chlazení. Proto pro sekundární chlazení bylo nutné vytvořit novou koncepci [17].

Ovalita předlitku (**viz.obr.17**) se vytváří na základě smrštění příčného průřezu při tuhnutí a ochlazování. Varianta s radiální konstrukcí ZPO umožňuje odlévat kruhové sochory, aniž by docházelo k deformacím v pásmu ohybu. Kromě toho podstatně zjednodušuje konstrukci ZPO, protože u konstrukce vertikálního lití je nutno použít větší množství hmotnějších válečků pro udržení tvaru předlitku vlivem vzniku deformací působením ferostatických sil tekuté fáze na tuhnoucí lící kůru. Tato varianta umožňuje od tohoto upustit. Lze použít válečky menších průměrů a menších hmotností, protože nedochází k větším deformacím pod krystalizátorem. Propracování varianty radiálního ZPO ukázalo, že spotřeba materiálu na rekonstrukci vertikálního ZPO podle první varianty představuje přibližně trojnásobek. A proto, varianta rekonstrukce s radiálním krystalizátorem může najít uplatnění, pokud deformace kruhového sochoru v zóně ohybu nepřevyšuje povolenou ovalitu, a v rámci zóny tuhnutí nedochází ke vzniku povrchových a podpovrchových vad. V souvislosti s tím byl zadán úkol na vytvoření modelu pro jednotlivé zóny lití. Byl stanoven matematický model s ohledem na proces vzniku zóny tuhnutí a chlazení předlitku a bylo zjištěno, že základní přínos pro vznik ovality je ohyb sochoru v základním poloměru. Bezprostředně ohyb zvyšuje ovalitu předlitku do 0,63 %, což se považuje za únosnou míru [17].

6.2.3 Matematický model teplotního pole předlitku

Charakteristickým rysem krystalizace kovu je dvoufázová zóna při přechodu z tekuté do pevné fáze. Průběh tuhnutí předlitku v dvoufázové zóně lze vyjádřit matematickým modelem přestupu tepla. Přítomnost dvoufázové zóny neumožňuje použití tradičních počátečních podmínek Stefana, které jsou založené na zobrazení hladké hranice oddělení fází. Je nutno předpokládat, že přenos tepla daleko lépe vystihneme pomocí funkcí nestacionárního přenosu tepla [17].

Funkce pro výpočty je přímo úměrná rychlosti tuhnutí taveniny a závisí na vlastnostech oceli. Do výpočtu se zavádí odpovídající délka kapalně fáze v určitém elementárním rozsahu taveniny v rozmezí dvoufázové zóny. Výsledný model umožňuje s dostatečnou přesností sledovat průběh teplotního pole při plynulém lití. Pro správné matematické řešení modelu přestupu tepla je nezbytné určit přesné počáteční podmínky. Především je důležitá počáteční teplota v krystalizátoru. Byl brán v úvahu i přenos tepla konvekci na povrchu předlitku. Metodika číselného řešení úkolu přechodu tepla byla řešena metodou konečných prvků [17].

6.2.4 Analýza deformace plynule litého proudu

Následný matematický model byl zaměřen na deformace lící kůry předlitku. Řešení úkolu napjatosti deformace /NDS/ tuhnucího předlitku patří ke třídě úkolů dynamiky spojitěho prostředí pro tělesa s měnícími se hodnotami. Charakteristická vlastnost takových těles spočívá, v tom, že v procesu zatížení mění konfiguraci a získávají nové materiální složení [17].

V tomto případě u jednoho a téhož tělesa nenajdeme stejný stav, a proto nelze hovořit o přemístění a deformacích, vznikajících jen vlivem sil. V matematické rovnici úkolu takového druhu se využívají proměnné, charakterizující momentální stav tělesa. Často při výpočtu NDS tělesa s měnícími se hodnotami se zpočátku vyznačují časové závislosti rychlostí deformací a změny napětí, a proto je integrují podle času od momentu tuhnutí konkrétního elementu a získávají deformaci a napětí v něm, přičemž se zohledňuje deformace jen tuhnucí části s odpovídajícími hraničními podmínkami na pohyblivé a nepohyblivé hranici.

Sledování vlastností oceli při teplotách, charakteristických pro stálé lití ukázalo, že základním faktorem, vymezujícím obecnou deformaci a vady materiálu, se jeví proces plasticity. Tím pádem deformaci plasticity je nutno zohlednit v obecném schématu chování tuhnucího materiálu [17].

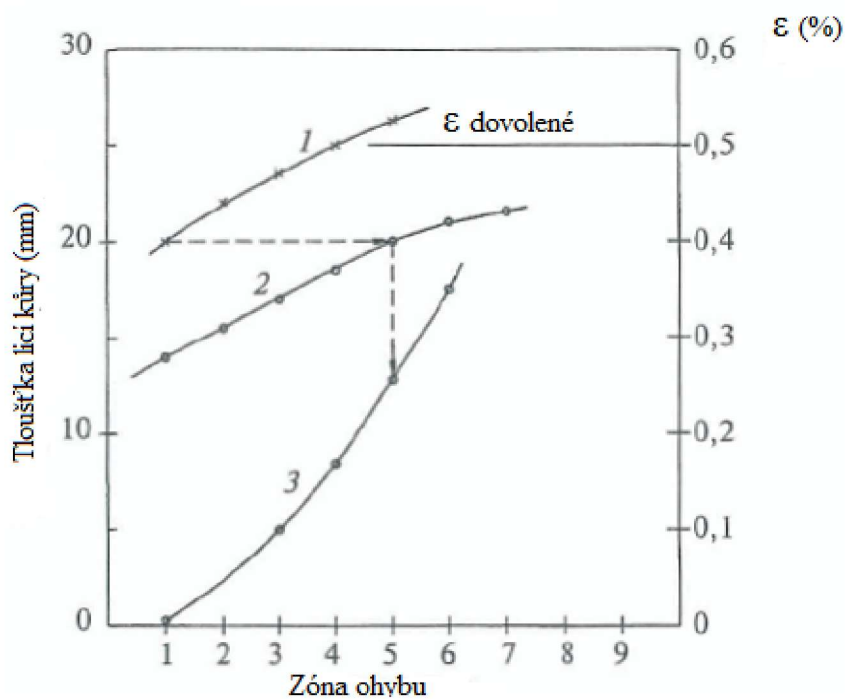
6.2.5 Zhodnocení výskytu vzniku vnitřních prasklin

Ve firmě byl analyzován vliv parametrů existující zóny ohybu na tvorbu vnitřních prasklin při lití předlitků prům. 200 mm, při max. rychlosti lití $2,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, což významně převyšuje rychlosti pro pravoúhlé (obdélníkové) předlitky.

Při experimentálním sledování mechanických charakteristik kovu v teplotách blízkých teplotě krystalizace bylo stanoveno, že všechny typy oceli mají teplotní interval lomu, tzn. interval, v kterém se vyskytuje prudký pokles mechanických vlastností. Často pokles plasticity u uhlíkaté oceli nepřevyšuje 0,5 %. Horní hranice intervalu lomu se blíží hranici likvidu, spodní je $100 - 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pod teplotou rovnovážného solidu. Pro popis procesu narušení lomem při vysokých teplotách použili koncepci neustálého hromadění deformací a vad.

Úroveň nahromaděných vrstevních deformací, přiléhajících k frontě krystalizace při ohybu, je proporcionální vzdálenosti od neutrální osy do těchto vrstev a zakřivení zóny ohybu [17].

Výpočty ukázaly, že veličina deformace, nahromaděné v nebezpečné vrstvě za období průchodu v zóně ohybu, nepřevyšuje přípustnou hranici a nedochází ke vzniku vnitřních prasklin. Výsledky znázorňuje graf na **obr. 16** [17].



Obr. 16: Graf znázorňující změnu souhrnné deformace při ohybu předlitku průměru 200 mm při rychlosti lití $2,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ [17]:

1,2 - horní a spodní hranice intervalu křehkosti (lomu)

3 - mezí vrstva celkové deformace

ϵ - přípustná deformace



Obr. 17: Ukázka ovality kruhového sochoru [1]

Závěrem lze shrnout, že pomocí modelů lze dostatečně přiblížit průběh procesů ještě neexistující technologie na takovou úroveň, aby bylo možné bez větších rizik přistoupit k rekonstrukci stávajícího ZPO a předpokládat, že byla vybrána nejvýhodnější alternativa.

Tento článek [17] je velmi zajímavý, ale bohužel chybí více informací k praktickému využití modelů k řešení trhlin.

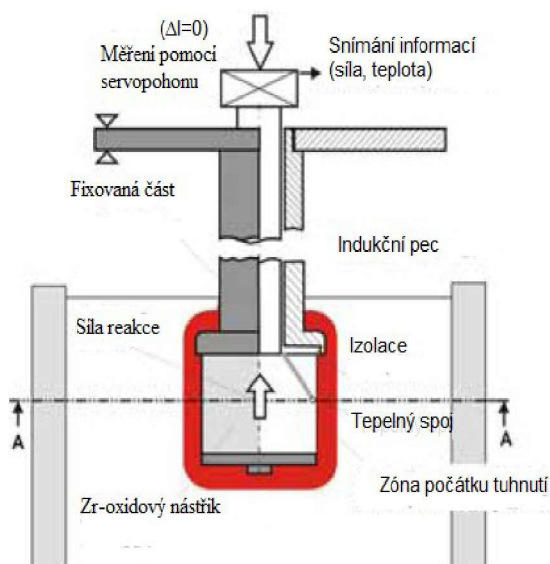
6.3 Podmínky tuhnutí peritektické oceli během plynulého lití a chování při vysokých teplotách.

Další zajímavý článek [18] pojednává o využití experimentů z příbuzných oblastí ocelářství a využití podobnosti chování oceli v určitých teplotních režimech a o snaze napodobit průběh tuhnutí oceli v krystalizátoru na dostupném zařízení s možností měření potřebných veličin.

Robert Pierer a Christian Bernhard se ve své práci [18] zaměřují na důležitou část numerického modelování plynulého lití, které představuje počáteční tuhnutí v krystalizátoru spolu s přestupem tepla, mechanismus tuhnutí lící kůry, tepelnou deformaci v krystalizátoru, oscilační vrásky a počáteční tloušťku lící kůry. Stažení oceli (v tekuté fázi) a tepelné smršťování (v tuhé fázi) společně se silovou reakcí tuhnoucí lící kůry mají významný vliv na utváření povrchových trhlin tvořících se za tepla a další defekty objevující se během plynulého lití. Mnoho studií na toto téma shrnuje komplexně práce p. Wolfa [18], který poukazuje na to, že oceli s obsahem uhlíku mezi 0.1 a 0.12 hm % jsou citlivější na tvorbu trhlin a náchylnější ke vzniku průvalu než jiné.

Tuto reakci popisuje tak, že v krystalizátoru probíhá minimální přenos tepla zásluhou nestejně vzdálenosti od menisku v rostoucí kůře. Nicméně, výpočet smrštění a stažení při teplotách blízkých solidu je komplikovaný a výsledky jsou silně ovlivněny přesností vstupních hodnot, které nelze odhadnout.

Práce [18] se také zabývá testovací metodou pro měření srážecí reakce (srážecí síla) během počátečního tuhnutí. Experimentální výsledky série testů jsou demonstrovány pro oceli s různými obsahy uhlíku (0,05 hm % - 0,2 hm %). K charakterizování termo-mechanické reakce byl vytvořen numerický model. Tento model je založen na jednoduché geometrii tuhnoucího předlitku a slouží k přiblížení elasto-plastických vlastností předlitku při tuhnutí a vzniku deformací za vysokých teplot. Jak výsledky z experimentu, tak i výsledky z výpočtu jsou předměty diskuze. V konečné fázi jsou výsledky výpočtů aplikovány na model k vysvětlení vlivu síly smrštění na nestejnorodý růst lící kůry [18].



Obr. 18: Schéma diagramu znázorňující metodu testování [18].

6.3.1 Průběh experimentu

Původní SSCT (působení smršťovacích sil v průběhu ochlazování) tažná metoda se vyznačuje podobností s porovnatelnými podmínkami při plynulém lití a již déle než 10 let probíhá výzkum k určení mechanických vlastností a citlivosti oceli na praskliny při vysokých teplotách. Zkušební ocelový blok, rozdělený na dvě poloviny, je ponořen do kapalného kovu v indukční peci. Na povrch testovacího tělesa je nanášena nástřikem tenká oxidová vrstva zirkonu. Povlak řídí podmínky chlazení a minimalizuje tření. Ocelový plášť tuhne kolem testovacího tělesa s hlavní krystalografickou orientací kolmo k rozhraní, jako u nepřetržitého lití. Síla mezi horní a spodní částí testovacího vzorku je měřena siloměrem a pozice spodní části indukčním snímačem polohy.

Servopohon s hydraulickým regulátorem kontroluje sílu a pozici. Toto zařízení viz. **obr. 18** umožňuje použití pro rozmanité druhy testování [18].

Obr. 18. ukazuje schematicky pohled na stažení a kontrakci při průběhu zkušební metody. Měření zkušební vzorku je upraveno oproti vysokoteplotní tahové zkoušce. Tato modifikace dovoluje vyšetřování chování tuhnutí oceli při ochlazení, buď měřením výsledného posunutí Δl (zkouška smrštění), nebo výsledné síly (silová zkouška smrštění).

Výsledky v tomto článku vycházejí ze série testů se stálými podmínkami chlazení a s proměnným obsahem uhlíku od 0.05 do 0.20 hm %.

S uvážením vlivu legujících prvků v peritektické oblasti, je použit ekvivalentní obsah uhlíku ve všech následujících výsledcích.

Tab.3. ukazuje chemické složení testované jakosti oceli, která je rozdělena podle obsahu uhlíku do tří kategorií A, B, C. Každá představuje rozdílný průběh reakce tuhnutí a jednotlivé druhy můžeme charakterizovat takto:

Počátek fázové přeměny oceli (δ - γ) typu A se uskutečňuje pod teplotou solidu, zatím co počátek přeměny oceli (δ - γ) typu B probíhá již během tuhnutí. Celkový rozsah přeměny (δ - γ) oceli typu C je nad teplotou solidu, což znamená, že transformace je ukončena již v tekutém pásmu.

Tab. 3: Chemické složení testovaných typů oceli [18].

Chemické složení testované oceli								
	Ocel č.	C	Si	Mn	P	S	Ni	C _p
A	1	0.05	0.29	1.52	0.012	0.004	0.017	0.07
	2	0.07	0.27	1.51	0.012	0.004	0.017	0.09
B	3	0.09	0.29	1.55	0.011	0.008	0.026	0.12
	4	0.13	0.31	1.57	0.014	0.004	0.017	0.15
C	5	0.15	0.28	1.56	0.014	0.005	0.018	0.17
	6	0.20	0.27	1.75	0.014	0.005	0.020	0.23

6.3.2 Termomechanické modelování pomocí silové zkoušky smrštění

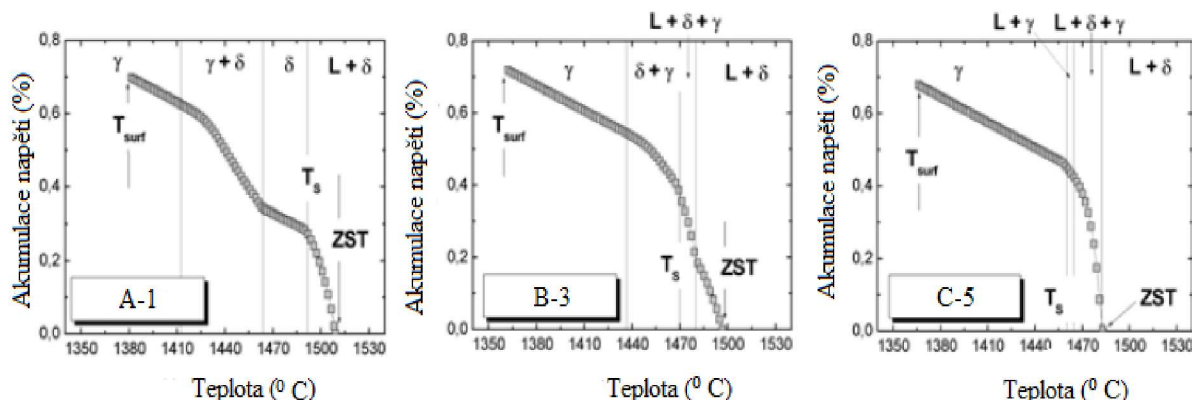
Za účelem vypočítat výslednou sílu smrštění byl vytvořen v termomechanický model, který se opírá o dobře známou Fourierovu rovnici vedení tepla [11]. Základními členy rovnice je entalpie, hustota, tepelná vodivost oceli jako funkce teploty za určitý čas. Byla použita tzv. metoda sítí založená na původní verzi pro tuhnutí v příčném řezu, která byla vyvinuta pro vysokoteplotní tahovou zkoušku (SSCT test) a detailně je popsán v jiném příspěvku [18].

V procesu výpočtu působící síly při smrštění se předpokládá, že utuhlá kůra je schopna vyvinout tlak v teplotách pod počáteční teplotou meze pevnosti (ZST). Nutno poznamenat, že silový test stažení je gradující s nestálými podmínkami. Teplota uvnitř ocelového pláště se téměř lineárně zvyšuje z povrchové teploty T_{surf} až k teplotám likvidu T_l , a mění se při době tuhnutí. Konečně tlak vypočtený použitím příslušných rovnic je snížený o ztrátu tlaku, zatímco poměr plasticity a rychlost, jsou přizpůsobeny nejlepší shodě s měřenou silou stažení [18].

6.3.3 Výsledky výpočtů

Grafické znázornění dosažených výsledků viz. **obr. 19** naznačuje nahromadění napětí podél utuhlé licí kůry pro každou skupinu testované oceli. Tloušťka licí kůry je nahrazena povrchovou teplotou T_{surf} [18].

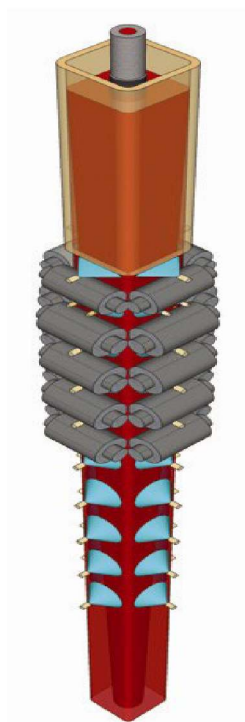
Ze srovnání vyplývá zřetelný vliv fázových přeměn na průběh napětí uvnitř pláště u jednotlivých typů oceli a vede automaticky k rozdílnému stažení během počátečního tuhnutí a lze pozorovat, že ocel typu B dosáhne maximální síly smrštní během velmi krátké doby.



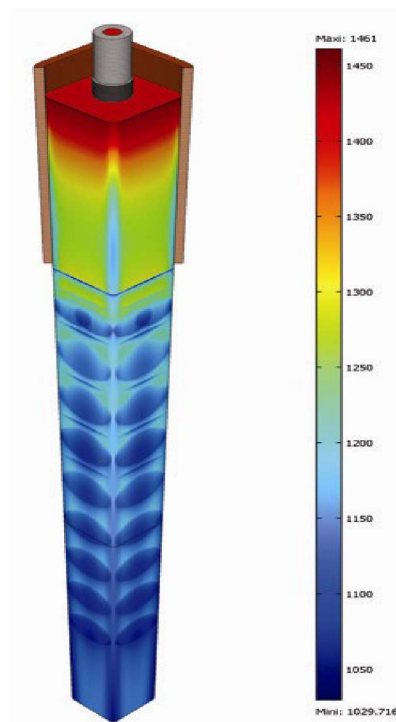
Obr. 19: Vypočítané hodnoty napětí při tvorbě licí kůry zkoumaných ocelí [18].

6.4 Optimalizace procesu lití oceli s využitím programu COMSOL Multiphysics

Do analýzy současné literatury lze v době elektronických knih zařadit i internetové zdroje. Na oficiálních stránkách firmy Humusoft [19] s.r.o. popisuje Bittner Karel ve svém článku využití programu COMSOL Multiphysics a jeho nastavbové moduly Heat s Structural Mechanics Modul k vytvoření modelu počátečního tuhnutí předlitku, který umožnil výpočet deformace povrchu sochory v průběhu tuhnutí, jak lze vidět na **obr. 20. a 21** [19].



Obr. 20: Zobrazení licího procesu [19].



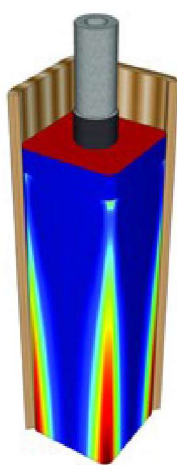
Obr. 21: Teplotní profil [19].

Počáteční tuhnutí předlitku vlivem neodpovídajícího chlazení vede k tvorbě trhlin, tvarových deformací a výrazných oscilačních vrásek. V průběhu ochlazování lící kůry se předlitek v krystalizátoru smršťuje a vytváří vzduchové mezery, viz. obr. 22, které je nutno optimalizovat.

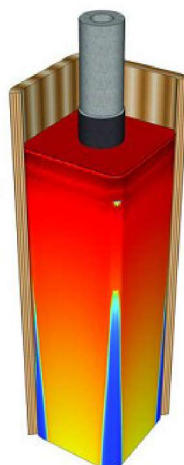
Úzká vzduchová mezera vzniká v příliš konické vložce krystalizátoru a následkem zvýšeného tření dochází k poškození lící kůry. Pokud se vzduchová mezera objeví příliš brzy, kdy je lící kúra ještě příliš tenká, objevují se vnitřní vady sochorů.

Program byl využit ve francouzské firmě Ugitech S.A. (světový výrobce nerezových ocelí). Vývojáři firmy optimalizovali teploty chlazení 150 různých jakostí a typů předlitek své produkce.

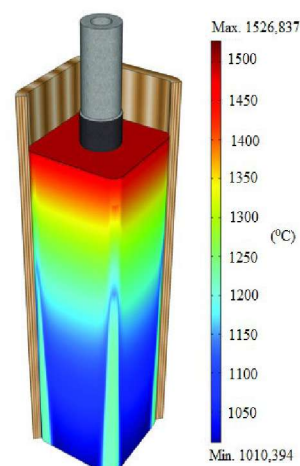
Modelování proběhlo ve více etapách. Byl vytvořen model pro přestup tepla, který objasnil teploty a fáze uvnitř předlitku. Následně vytvořili termomechanický model pro lepší pochopení přechodů mezi vložkou krystalizátoru a předlitkem. Model pomohl objasnit vznik poruch na povrchu i možnosti odstranění viz obr. 23 a 24.



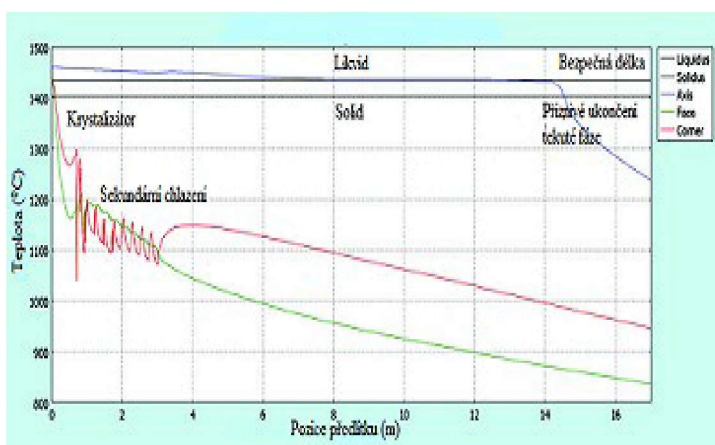
Obr. 22: Vznik vzduchové mezery [19].



Obr. 23: Průběh tepelného toku [19].



Obr. 24: Průběh teploty v předlitku [19].



Obr. 25: Modelový výpočet bezpečné délky [19].

Důležité bylo vyladění modelu pomocí počátečních podmínek mezi vložkou krystalizátoru a ocelí. Bylo shromážděno velké množství dat pro každý druh předlitku (např. experimentálně) a ve formě tabulek vložena do programu. Model dokáže také velice přesně odhadnout bezpečný limit tekutého jádra viz obr. 25.

Program COMSOL Multiphysics pro modelování fyzikálních úloh lze pořídit komerční cestou a ve spolupráci s jinými programy může být propojen i on-line [19].

7 SHRNUÍ LITERÁRNÍCH POZNATKŮ

Zásadní poznatky aktuální celosvětové literatury z oblasti problematiky výroby plynule lité oceli a optimalizace procesu chlazení pomocí matematických modelů teplotního pole předlitku s cílem minimalizace vad je možno definovat následovně:

1) Předpokladem trvale kvalitní a konkurenceschopné výroby plynule lité oceli je nutnost optimalizace procesu například pomocí využití metody matematického modelování nebo provozních experimentů.

2) Základní problematika modelování a existence potřebných početních rovnic pro matematické modelování je známá již dlouhou dobu. Největší problém tkví ve složitostech výpočtů, v zadávání vstupních počátečních hodnot do příslušných sestav modelů. To je dáno především složitostí tepelných procesů při plynulém lití a nemožnosti získat přesné hodnoty měření bez použití náročných experimentů. Tím lze také zdůvodnit vývoj literárních studií, a již existující jsou zdokonalovány, obohacovány o nové, přesné hodnoty z experimentálních pokusů, ať už přímo na jednotlivých ZPO, či vědeckých laboratořích.

3) Ke stanovení teplotního pole plynule lité bramy lze využít dvě metody: numerickou metodu (s využitím naměřených teplot) a tzv. izotermickou metodu. Zde byly využity naměřené hodnoty z experimentu s wolfram-rheniovým termočlánkem. Bohužel podrobnosti experimentu nejsou známy, ale velice shodné výsledky modelování jsou zřejmé.

4) Při výstavbě nových, či rekonstrukci stávajících ZPO dnes již bývá matematické modelování nedílnou součástí počáteční fáze přípravy. Matematické modelování napomáhá reálně se přiblížit výrobním možnostem navrhovaných technologií s důrazem na všechny aspekty výroby od tvaru krystalizátoru, tvaru liciho oblouku až po rychlost lití v závislosti na vzniku vad plynule litých sochorů. Komplexní modelování liciho stroje není z hlediska náročnosti možné. Proto je vhodné rozdělit modelování na dílčí úseky, pro které se jednotlivé modely přizpůsobí. Prvořadé je modelování teplotního pole v krystalizátoru, jako nejdůležitějšího článku budoucí konstrukce ZPO. Správná volba krystalizátoru s vhodným zakřivením oblouku může pomocí matematických modelů a s použitím vhodných experimentálních srovnání určit správnou alternativu výstavby ZPO, bez nákladných rizik provozu zkouška – omyl.

5) Peritektické oceli jsou náchylnější k tvorbě vad při plynulém odlévání oceli, než ostatní druhy oceli. Spočívá to především ve vlivu fázových přeměn na průběh napětí uvnitř pláště u jednotlivých typů oceli a vede automaticky k rozdílnému stažení během počátečního tuhnutí v krystalizátoru. K měření průběhu těchto sil lze využít stávající testovací zařízení pro měření tažné síly a po úpravách lze napodobit průběh tuhnutí oceli v krystalizátoru na dostupném zařízení s možností měření potřebných veličin, což je velice zajímavé. Byla prokázána příznivá shoda mezi výsledky zkoušek a matematickým modelem.

6) Při modelování teplotního pole při plynulém odlévání oceli lze velice dobře využít i komerčně dosažitelné počítačové programy. Důležité je však vyladění modelu pomocí počátečních podmínek mezi vložkou krystalizátoru a ocelí. Výhodou oproti experimentálnímu měření je možnost vložení do programu velkého množství vstupních dat ve formě tabulek. Problém ale tkví v získání těchto hodnot, právě pomocí experimentů. V případě dostatečného množství přesných údajů lze pomocí modelu určit i bezpečnou délku tekuté fáze předlitku. Pomocí přídatných nastavbových modulů lze program využít při plynulém odlévání on-line přímo v provozních podmínkách.

7) Z analýzy současné literatury vyplývá absence přesných popisů jednotlivých experimentů spojených s modelováním teplotního pole. Pro přesné pochopení problematiky popisované v příspěvcích z konferencí a ostatní současné literatuře, zabývající se převážně dílčími problémy plynulého odlévání oceli, je nutné mít možnost účastnit se podobných výzkumů v této oblasti. Lze předpokládat, že podrobnosti pokusů k získávání co nejpřesnějších vstupních hodnot v oblasti matematického modelování teplotního pole jsou v rámci konkurence chráněny.

8 ZÁVĚR

V souladu se zadáním obsahuje bakalářská práce aktuální celosvětové poznatky z oblasti výroby oceli na zařízeních plynulého odlévání a optimalizace technologie využitím moderních metod modelování teplotního pole předlitku s cílem minimalizovat velikost vad předlitků a zajistit trvale kvalitní produkci.

Jsou zde uvedeny zajímavé ukázky využití modelů přímo v praxi pro optimalizaci plynulého odlévání oceli se zaměřením především na chlazení ocelových sochorů. Jak z analýzy světové literatury vyplývá, největší důraz je kladen na krystalizátor jako základní prvek odvodu tepla a tvar vložky krystalizátoru, která velkou měrou ovlivňuje kvalitu předlitku. Pak následuje sekundární chlazení, které musí splňovat vysoké nároky na regulaci a zachovávat svou intenzitu při změnách rychlosti. Nemalou pozornost zasluhuje i terciární chlazení, které se při nesprávném nastavení podílí na deformacích ocelových sochorů.

Závěrem této práce, je třeba zdůraznit, že jakýkoli model lze uplatnit jen při striktním dodržení všech zadaných podmínek. Musí být bráno v úvahu, že vytvořený model či program je určen pro konkrétní zařízení plynulého odlévání, jakost a formát předlitku. Navíc se zde nebere v úvahu stáří ZPO, změna provozních vlastností a třeba i chyby obsluhy. Z praktických poznatků lze usuzovat, že i drobné chyby nebo nedostatky vzniklé provozem ZPO mohou ovlivnit kvalitu předlitku velkou měrou.

Největší problém dnes lze vidět v tom, že nejnovější poznatky ovlivňující kvalitu lití by měly být prezentovány co nejširšímu okruhu lidí, spolupracujícími přímo při odlévání oceli a měli by být seznámeni, jakým způsobem jejich práce ovlivňuje kvalitu vyráběné produkce. Dnes se setkáváme jen s kusými pracovními postupy, jak je třeba danou činnost vykonávat, ale jak případná činnost vybočující z běžného postupu ovlivňuje kvalitu, se již řadový pracovník nedozví. To znamená spojit výsledky vědeckých prací s realitou výrobních procesů a zapojit do zkvalitnění produkce všechny články výroby.

Na to se zaměřili například ve společnosti ArcelorMittal a pořádají ve spolupráci s VŠB-TU Ostrava pro nejširší okruh svých pracovníků přednášky se zaměřením na jednotlivé aspekty výroby železa a oceli, což může v budoucnu přinést výsledky ve zkvalitnění produkce zodpovědným a kvalitním přístupem každého pracovníka.

Použitá literatura

- [1] VÁLEK, Ladislav. Soukromý archiv nepublikovaných fotografií, 2011.
- [2] HUTNICTVÍ ŽELEZA, A.S., *Historie Ocelářství*. Dostupný z WWW (17.4.2011): <http://www.hz.cz/cz/historie-ocelarstvi,>.
- [3] ŠTĚTINA, Josef. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy*. Ostrava, 2007. Disertační práce (Ph.D.). VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tepelné techniky, 2007-03-25. Dostupná z WWW (17.4.2011): <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/stetina/disertace/index.htm>,.
- [4] BAŽAN, Jiří. *Lití a krystalizace oceli*. Ostrava, 2008. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra metalurgie. Dostupná z WWW (17.4.2011): <http://www.fmfi.vsb.cz/cs/okruhy/studium-a-vyuka/podklady-ke-studiu/studijni-opory/>
- [5] BÖHM, Zdeněk.; KUČERA, Jaroslav. et al. *Plynulé odlévání oceli*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1992. 443 s ISBN 80-03-00661-9.
- [6] VÁLEK, Ladislav. Soukromá sdělení, 2011-04-11.
- [7] Oficiální stránky firmy HENNLICH. Dostupné z WWW (10.5.2011): <http://www.hennlich.cz/produkty/trysky-zvlastni-aplikace-trysek-aplikace-trysek-v-hutnim-prumyslu-296.html>>
- [8] VÁLEK, Ladislav. Soukromé sdělení, 2011.
- [9] PŘÍHODA, M.; RÉDR, M. *Sdílení tepla a proudění*. Ostrava, 2008. Skriptum. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tepelné techniky. ISBN 978-80-248-1748-4.
- [10] JANČÍKOVÁ, Zora. *Modelování a simulace*. Ostrava 2008. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii. Dostupné z WWW (17.4.2011): <http://www.fmfi.vsb.cz/cs/okruhy/studium-a-vyuka/podklady-ke-studiu/studijni-opory/>
- [11] MACHÁČKOVÁ, Adéla.; KOCICH, Radim. *Sdílení tepla a proudění*. Ostrava, 2010. Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu. VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra tepelné techniky. (V tisku)
- [12] PŘÍHODA, Miroslav.; BAŽAN, Jiří. et al. *Nové poznatky z výzkumu plynulého odlévání oceli*. 1.vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2001. ISBN 80-248-0037-3
- [13] TVARDEK, P; BAUKO, D. et al. Využití expertního systému pro operativní řízení výroby. In *12. mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL 2003*. Hradec nad Moravicí, Česká republika, 2003. Dostupné z WWW (17.4.2011): <http://konference.tanger.cz/data/metal2003/sbornik/papers/161.pdf>>

-
- [14] VELIČKA, M, et. al. Numerické modelování tepelných procesů plynulého odlévání oceli. *HUTNICKÉ LISTY*. 2010, roč.LXIII, č. 5, ISSN 0018-8069.
- [15] Manojlovič, R.; Jašovskí, V.; *Mathematical Modeling of Temperature Field in the Continuous Casting of Steel Slab* (part two). Faculty of Technology and Metallurgy of University "Sv. Kiril and Metodij", R. Boskovic 16, 1000 Skopje, Macedonia, Prímljeno: 15. 09. 2005., UDC:669.14-412-143-971=20
- [16] Termoelektrické jevy,. Dostupný z WWW (7.11.2011):
<http://moon.felk.cvut.cz/~pjv/Jak/_phys/f577/start.html>
- [17] ШАПІРО, А.В.; ГАНКІН, В.Б. et al. ОАО “ АХА” ВНИИметмам“ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2008. УДК 621.746.047:621.774
- [18] PIERER, R.; BERNHARD, Ch. *High Temperature Behavior during Solidification of Peritectic Steels under Continuous Casting Conditions*. Christian Doppler Laboratory of Metallurgical Fundamentals of Continuous Casting Processes; University of Leoben; Franz Josef Str. 15; 8700 Leoben; Austria, 2006.
- [19] Bittner, K. HUMUSOFT s.r.o. *Optimalizace procesu lití oceli s využitím programu COMSOL Multiphysics..* Dostupný z WWW (10.5.2011):
<<http://www.humusoft.cz/archiv/clanky/comsol/2009-cdesign-3/>>